

ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE LA MATRIZ DIFUSA PARA EL TRATAMIENTO DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES

A. Cristo, P.J. Martínez, D. Valencia, L.M. Hernández, R.M. Pérez, A. Plaza, J. Plaza y P.L. Aguilar

Department of Technology of Computers and Communications,
University of Extremadura,
Avda. de la Universidad s/n, E-10071 Cáceres, Spain

Resumen

This paper proposes a new format for storing and processing hyperspectral images captured by airborne spectrometers. Obtaining such kind of images is difficult, because the sensor that takes the images is carried in an aircraft that suffers turbulences while the camera is obtaining the information from the different pixels of the image. So, a non real time geo-rectification process is necessary to correct the information of different bands. The format proposed in this paper, DMF (Diffuse Matrix Format), allows a more efficient storage, because a list with the original information received in the sensor is saved for each position (X,Y) of the scanned ground. The format of the list saves space and time because no redundant information is saved using it. To show the possibilities of this new format an application that makes some thresholding and filter operations has been built. This program, firstly, creates the diffuse matrix in memory from the file that stores the image information, and then, some filter operations are executed over the diffuse matrix to check it. In this way, we prove that diffuse matrix processing is faster and simple, as well as the space used in the disk for its storage is quite less than the space used by standard formats.

1 Introducción

Los satélites que observan la Tierra producen cada día muchos terabytes de datos que son almacenados en grandes ficheros. La mayoría de estos datos son importantes no sólo para las aplicaciones actuales, sino para posibles usos dentro de varias décadas o siglos [1].

El gran espacio de almacenamiento que requieren las imágenes obtenidas por estos satélites hace necesario desarrollar nuevos formatos que minimicen el espacio de almacenamiento. Una de las mayores aplicaciones del almacenamiento de esta gran cantidad de información es el estudio de la detección de los cambios producidos en la superficie terrestre. El principal problema de este tipo de estudio es la dificultad existente para poder comparar diferentes imágenes tomadas por diferentes sensores y en diferentes fechas. Por este motivo los nuevos formatos deben facilitar la comparación de imágenes obtenidas por diferentes sensores y en diferentes orientaciones.

Las imágenes remotas de la superficie terrestre se ven afectadas por los movimientos de la plataforma, por los errores GPS/INS (y por los errores que se producen en el proceso de geocorrección de la imagen). Los nuevos formatos deben tener en cuenta estos errores y la imposibilidad de reproducir exactamente la localización de los píxeles sobre la imagen en cada nueva adquisición. Los errores de posicionamiento son más importantes en el caso del tratamiento de las imágenes hiperespectrales, una de cuyas principales aportaciones es el análisis subpíxel. La precisión que se obtiene en este tipo de análisis depende directamente de la exactitud de la posición del píxel y de la preservación de la información espectral obtenida por el sensor sobre las imágenes, ya que no podemos tener una precisión subpíxel si no sabemos exactamente la posición del mismo [2]. Por este motivo, los nuevos formatos de datos deben preservar la precisión de la información espacial y espectral.

1.1 Construcción de la imagen

Los sistemas de registro hiperespectral de la superficie terrestre construyen una imagen bidimensional del suelo para cada una de las bandas capturadas. La imagen captada por el sensor depende de la altura

de vuelo sobre el terreno, así como del ángulo instantáneo de captura del sensor (IFOV). La porción elemental de suelo que corresponde a un píxel de la imagen en un instante dado se denomina GIFOV, el tamaño de este área determina la resolución espacial del sistema [3]. En los sistemas de empuje, este tamaño depende de la altura de la plataforma, de la velocidad con la que se desplaza y de los intervalos de tiempo entre la obtención de las distintas muestras de la superficie terrestre.

Cuando el sensor adquiere la imagen sufre desplazamientos que distorsionan la posición y la forma de los objetos. A pesar de ello, la forma en la que se almacenan los píxeles en esta imagen (denominada RAW) corresponde a una matriz, pero estos movimientos hacen que la posición de los píxeles en la matriz no esté directamente relacionada con la posición de los píxeles sobre el terreno, como puede comprobarse en la *Figura 1*. Para obtener la posición real de cada píxel debemos utilizar los valores que ha almacenado el sistema GPS/INS de la plataforma en cada instante de tiempo. Estos valores están afectados por unos errores experimentales Δx e Δy . Además, la aleatoriedad de los movimientos de la plataforma hacen que la posición de los centroides de los datos adquiridos en una imagen no sean los mismos que los adquiridos en otra imagen de la misma escena (aunque se adquieran con el mismo sensor, la misma plataforma y a la misma altura).

En la *Figura 1 a)* representamos una porción de una imagen RAW. En ella se pueden ver los errores en la posición de los píxeles superpuestos a la escena real. Estos errores disminuyen la utilidad del procesamiento espectral de los datos para realizar análisis subpíxel. Si realizamos el análisis subpíxel sobre la imagen RAW tendríamos la ventaja de utilizar los valores espectrales medidos directamente por el sensor y los inconvenientes introducidos por la incorrecta distribución espacial de los datos

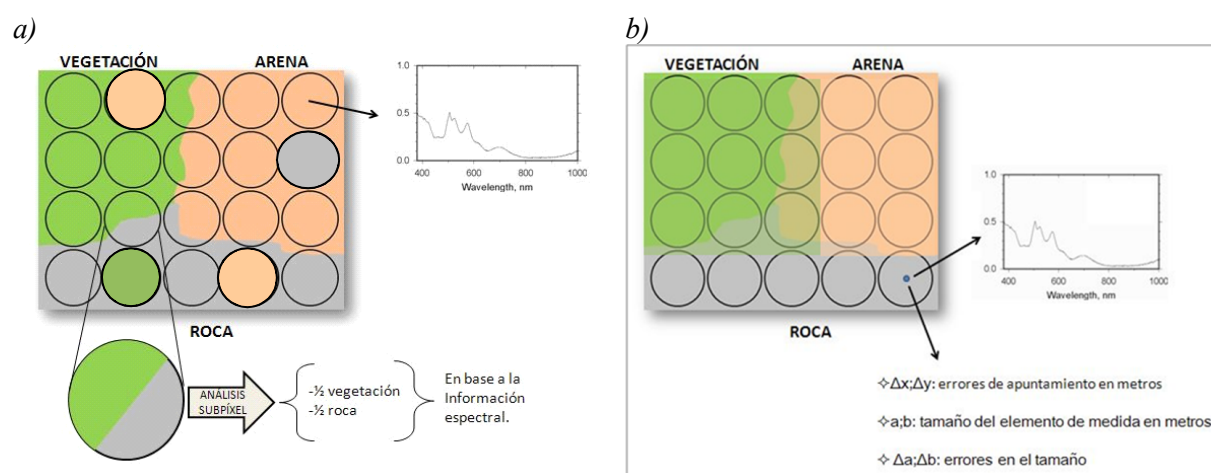


Figura 1: a) Imagen RAW mostrando los GIFOV de los píxeles . b) Imagen corregida mostrando la recuperación de las formas y los cambios introducidos a nivel subpíxel.

Si realizamos el proceso de geocorrección, obtendremos una disposición regular de los datos que corresponde con su posición espacial, pero habremos:

- 1) Introducido desplazamientos en la posición espacial de los espectros.
- 2) Realizado estimaciones para elementos de la cuadrícula donde no se han realizado mediciones.
- 3) Promediado, en algunos casos, la información espectral.

La *Figura 1 b)* muestra la misma porción de la imagen una vez geocorregida y dispuesta en una distribución regular en la orientación deseada.

En el análisis de imágenes se asume que los errores de posicionamiento son $\Delta x \approx a$; $\Delta y \approx b$ (± 1 píxel). En realidad debemos tener en cuenta que los valores de “a” y “b” determinan el área de integración del sensor, Δx y Δy dependen de la precisión del dispositivo GPS/INS y los movimientos de los píxeles que se observan en la *Figura 1 a)* dependen de los movimientos de la plataforma. Para analizar la

importancia de estos errores y ver la influencia que tienen en el análisis subpíxel veamos el siguiente ejemplo:

Consideremos una escena en la que existen viviendas, si se está trabajando a nivel “sub vivienda” no se pueden permitir los mismos errores de apuntamiento que en el caso del tratamiento de imágenes convencionales, ya que cuando se pretende descubrir lo que hay dentro de una casa es necesario asegurarse de que no se está apuntando a otro punto ligeramente desplazado del primero, como puede verse en la *Figura 2*. Estos errores del sistema GPS/INS influyen directamente en el análisis subpíxel.

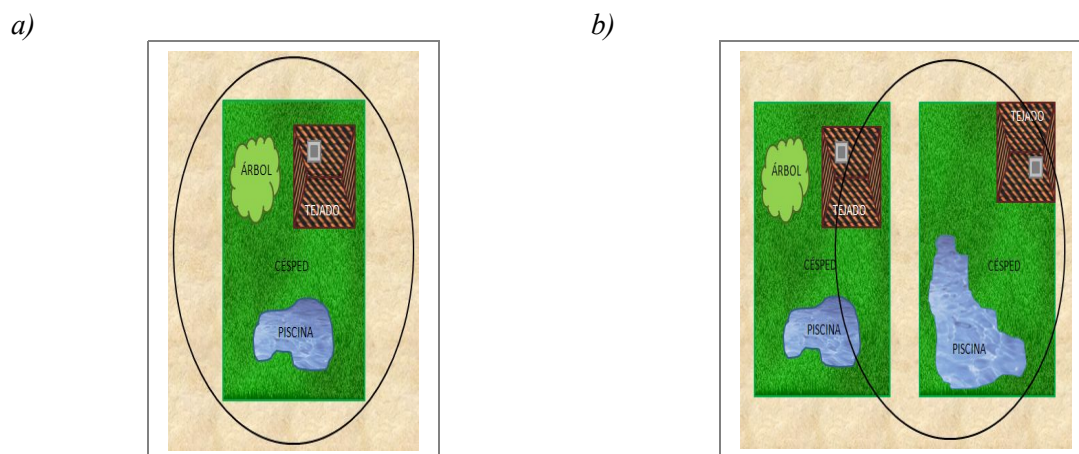


Figura 2: a) Elemento de resolución del terreno centrado en una parcela. b) Posible error en el apuntamiento de un sensor.

Además, se deben tener en cuenta los problemas de alineamiento con el objeto estudiado, es decir, la regularidad en el muestreo que no está directamente relacionada con el posicionamiento. De hecho, puede saberse con mucha precisión el sitio al que apunta un sensor aeroportado, pero los posibles movimientos del avión introducen una componente aleatoria que impide asegurar la repetitividad de la medición y dificultan la comparación con medidas procedentes de otro vuelo y dificultan la detección de cambios en una serie temporal de imágenes hiperespectrales.

El sistema GPS/INS nos permite corregir los errores de posicionamiento debido a los movimientos de traslación y rotación del avión, pero no puede solucionar el componente aleatorio de estos movimientos. El procedimiento de la geocorrección de la imagen a partir de los ángulos de posicionamiento, de la altura de la plataforma y del modelo de elevación del terreno (DEM) se encuentra descrito en [4].

El resultado final del proceso es un cubo de datos que corresponden a un muestreo espacial regular de la cubierta. Realmente, cada uno de los vectores elementales de la imagen ha sido obtenido con diferente IFOV (ángulo sólido de integración) y diferentes intervalos de muestreo (espacial y, también, espectral).

Este muestreo irregular es similar al que se produce en un trabajo de campo, donde una persona realiza medidas de campo siguiendo una línea, provisto con un espectro radiómetro, y su posición viniese determinada por un GPS de precisión $\pm\Delta x$. Si el individuo realiza las medidas a intervalos regulares de tiempo T , pero no se mueve a velocidad constante, se produciría el error de muestreo ilustrado en la *Figura 3*.

Punto de vista espacial.

Situación ideal para análisis cualitativo: $(x_1 - x_2) = \text{GIFOV}$

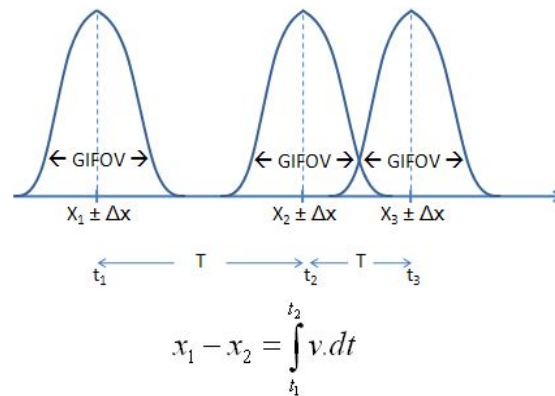


Figura 3: Error de muestreo a intervalos regulares de tiempo.

En el caso de la *Figura 3*, no sabemos la velocidad a la que se desplaza la persona, aunque sí se pueden realizar estadísticas de su movimiento (x , y). Estas estadísticas pueden proporcionarnos información del tamaño efectivo de la cuadrícula de la imagen. Utilizando cuadrículas de este tamaño nos aseguramos que tenemos como mínimo un dato real en cada una de ellas.

En el espectro electromagnético se produce una situación parecida, el aparato mide la radiancia producida por el GIFOV a distintas longitudes de onda, pero el muestreo tampoco se realiza a intervalos regulares de longitud de onda debido a que, en muchos casos, un sensor hiperespectral ofrece datos provenientes de varios sensores que trabajan a diferentes longitudes de onda y tienen diferente IFOV.

Todos estos factores deben tenerse en cuenta para aumentar la precisión de los resultados de un proceso de tratamiento de imágenes.

En este artículo se presenta una nueva estructura de datos para imágenes hiperespectrales que intenta minimizar el impacto de las circunstancias analizadas sobre los resultados que se obtienen en el tratamiento de este tipo de imágenes

El resto del artículo se estructura de la siguiente forma: en el *apartado 2* se describen las diferentes estructuras de datos para almacenar imágenes hiperespectrales. En el *apartado 3* se describe la estructura de datos propuesta, la Matriz Difusa (DMF), sus dos formatos de almacenamiento (disco y memoria), y se analiza la aplicación a la estructura DMF de técnicas básicas de procesamiento de imágenes. En el *apartado 4* se realiza una comparación entre los distintos formatos analizados, en relación con el tamaño del fichero y el tiempo de procesamiento. Y para terminar, en el *apartado 5* se describen las conclusiones obtenidas en este estudio.

2 Formato de datos.

Actualmente, uno de los problemas que podemos encontrar a la hora de trabajar con imágenes de satélite es que no existe un formato estándar que permita el almacenamiento de la información capturada por los sensores, sino que cada proveedor entrega sus productos con un determinado formato diseñados por la misma compañía u organización.

Generalmente, se suele trabajar con 4 tipos de ficheros que representan una única imagen hiperespectral [3]:

- 1) Fichero cabecera (header): Contiene descripciones textuales y numéricas de los datos almacenados en el segundo fichero (metadatos).
- 2) Fichero IGM: Fichero de las mismas dimensiones que el fichero de datos, donde cada celda indica la localización UTM del píxel en esa misma posición.
- 3) Fichero GLT: Fichero de información de geocorrección de la imagen. Cada celda de la misma indica un píxel de la imagen geocorregida, almacenando la posición x e y del valor correspondiente en el fichero de datos. Si este valor es positivo, se trata de una medida en su posición real. Si es negativo, indica que el valor asignado a ese píxel no ha sido realmente medido, sino asignado mediante la búsqueda del vecino más próximo (o promediado). Valores a 0 indican que no hay medida para ese píxel.
- 4) Fichero de datos: Contiene los valores para cada píxel en todas sus bandas. La manera de almacenar esta información es variada y depende del diseño del proveedor, pero existen dos formatos que son los más extendidos debido a su sencillez: el Band Sequential (BSQ) y el Band Interleaved by Line (BIL). El primero almacena, para cada banda, los valores correspondientes píxel a píxel, mientras que el segundo, almacena para cada píxel, sus valores correspondientes para cada banda.

Sin embargo, estos dos tipos de ficheros de datos no son los únicos existentes, y como hemos comentado con anterioridad, cada proveedor suele establecer un diseño acorde al instrumental utilizado y que permita un mejor acceso a la información, así como la reducción del tamaño del set de datos para optimizar su distribución y agilizar el tiempo de análisis, como es el caso de los formatos GeoTIFF [5], ER Mapper [6], ERDAS IMAGINE [7], etc.

A pesar del amplio abanico de tipos de almacenamiento de imágenes hiperespectrales, y gracias al esfuerzo del CEOS (Committee on Earth Observation Satellites) [8] en desarrollar formatos estándar, parece que el formato con más proyección, es el adoptado por la NASA para el programa Earth-Observing System (EOS), denominado Hierarchical Data Format (HDF), actualmente en su versión 5 [9].

HDF, en esta versión, utiliza 2 tipos básicos:

- Conjunto de datos (Dataset), un vector multidimensional de elementos de datos.
- Grupo (Group), una estructura para agrupar objetos.

Además, estos dos tipos de objetos pueden tener atributos (Attributes), pequeñas estructuras con texto que van asociadas a set de datos y grupos.

3 Matriz Difusa (DMF)

Como se ha mencionado en la introducción, es necesario definir nuevas estructuras de datos para optimizar la forma en la que se almacena la información que obtenemos de la superficie terrestre. Las líneas en las que se debe mejorar estos formatos son: la preservación de la información espacial y espectral medida por el sensor; minimización del espacio ocupado por la imagen, evitando almacenar información duplicada; y optimización del tratamiento de la imagen en sistemas de supercomputadores.

En este apartado se propone el diseño de una nueva estructura de datos denominada Matriz Difusa (DMF) que intenta mejorar el funcionamiento de los formatos actuales, de acuerdo con las propuestas de mejoras que se ha comentado [6].

Esta estructura de datos está basada en un registro de medidas (DMR), que almacenaría la información relativa a cada una de las medidas reales tomadas por el sensor. Éstas son la latitud y longitud del punto que se está capturando, y su espectro (*Figura 4 a*)).

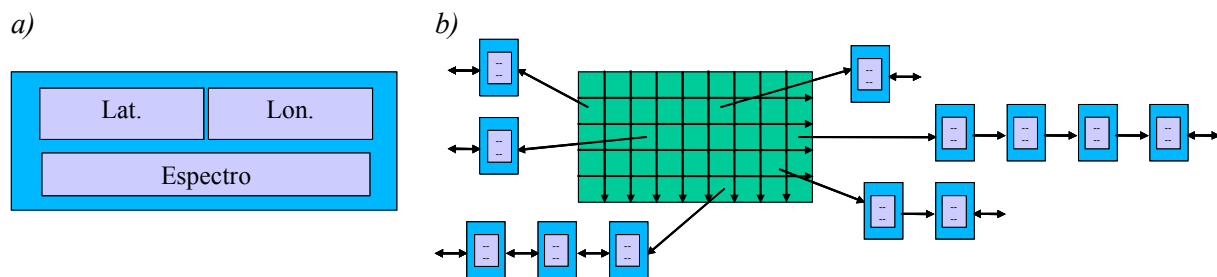


Figura 4: a) Estructura de un DMR. b) Estructura del nuevo formato propuesto, la Matriz Difusa (DMF).

Estos registros DMR se situarán sobre una cuadrícula, la cual denominamos Matriz Difusa, según su localización UTM. Esta matriz es una red espacial regular que puede estar orientada en la dirección N/S y en la que el tamaño de la casilla elemental debe determinarse a partir de la incertidumbre en la posición del píxel debida a los movimientos de la plataforma. Una primera aproximación es seleccionar un tamaño en el que cada casilla tenga como mínimo un valor real (DMR). Utilizando este esquema, es posible ubicar cada uno de los DMR's en una celda determinada dependiendo de su localización UTM. Con esto conseguimos que cada medida esté espacialmente situada en su casilla permitiendo realizar el tratamiento de la imagen en tiempo real, sin depender de una fase previa de geocorrección.

Hay que tener en cuenta que pueden existir medidas espacialmente muy cercanas a las que pueden corresponderle una misma celda (siendo este hecho mayor si la resolución de la matriz es menor, es decir, si el tamaño de la celda es mayor), por lo que, en vez de realizar un promediado o una sustitución del DMR de esa celda, se almacenarán todos los valores correspondientes. Por lo tanto, como podemos comprobar en la *Figura 4 b)*, cada celda de la matriz será un puntero a una lista de DMR's. Esto permite trabajar siempre con los valores reales y facilita los cambios de escala de la imagen sin pérdida de información. De esta manera, podemos pasar de tener una imagen de máxima resolución que como máximo tiene un DMR en cada casilla, a tener una matriz mínima de una única casilla que contiene todos los datos de la imagen.

Sólo existe un caso en el cual realizaremos el promediado de los espectros de dos medidas, almacenando sólo una de ellas, y será cuando ambas estén dentro de la incertidumbre de apuntamiento (Δx , Δy) que permiten el sistema de posicionamiento GPS / INS. Cuando esto ocurra, el hecho de realizar un promediado no implica una pérdida de información sino que implica una disminución del ruido.

De la misma manera, en nuestra Matriz Difusa podremos encontrarnos celdas que no contienen ningún valor, debido a que el sensor no ha tomado ninguna medida en ese intervalo.

3.1 Almacenamiento de la Matriz Difusa

A la hora de almacenar la Matriz Difusa en disco no guardamos la estructura en sí, si no que almacenamos secuencialmente todos los valores DMR uno detrás de otro, es decir, un fichero DMF está compuesto por una secuencia de registros DMR. De esta forma únicamente salvamos medidas válidas junto con sus coordenadas geográficas, y no almacenamos valores inválidos o promediados como en el caso de la imagen geocorregida. Por tanto, es fácil llegar a la conclusión de que la diferencia entre el tamaño en disco de la Matriz Difusa y el tamaño de la imagen geocorregida será mayor cuanto más movimiento haya experimentado la plataforma durante la obtención de los datos.

Por otra parte el esquema de matriz difusa supone un coste de almacenamiento extra que corresponde a la inclusión en el registro DMR de los valores de longitud y latitud, que no se almacena en los ficheros que contienen una imagen convencional.

A la hora de cargar el fichero donde residen los DMR, únicamente es necesario leer todos los elementos secuencialmente mientras se construye la Matriz Difusa, insertando cada uno de ellos en sus celdas correspondientes según sus coordenadas geográficas.

3.2 Procesamiento de imágenes DMF

Para analizar el funcionamiento de la matriz DMF se han adaptado técnicas básicas de procesamiento de imágenes convencionales al formato MDF:

- Umbralizado: Consiste en eliminar aquellos píxeles cuyo módulo del espectro no supere un valor predefinido. Para realizar esta tarea a una imagen hiperespectral convencional es necesario recorrerla píxel a píxel y eliminar aquéllos (poner espectro a 0) que no superen el valor umbral. La manera de realizar esta operación es similar en la estructura propuesta, pero existe la ventaja de que hay píxeles que no tienen asignado ninguna medida y por tanto no es necesario emplear tiempo de cómputo en analizarlo. Por el otro lado, podemos encontrarnos con celdas con dos o más valores, por lo que es necesario recorrer una lista y someternos a la secuencialidad.
- Técnicas de convolución: Consisten en asignar un nuevo valor a cada píxel después de analizar los vecinos que engloba una ventana que recorre la imagen denominada “ventana de convolución”. Técnicas muy conocidas son los filtros mínimo, máximo, de media, de mediana, etc. La manera de realizar dicha operación en la estructura de datos propuesta varía un poco, pues en vez de utilizar un tamaño de ventana $n \times m$ para buscar los vecinos, lo haremos mediante un radio r . Todos los elementos DMR que estén a una distancia menor de ese radio al DMR actual, serán considerados para aplicar la operación de convolución.

4 Resultados

Para probar la eficiencia de la estructura de datos propuesta, se han realizado varias pruebas con una imagen hiperespectral representativa correspondiente a la zona de Cuprite, NV (USA). Dicha imagen fue capturada por el instrumento AVIRIS [10], a una altura media de 1590.82 m, y posee 224 bandas.

Esta imagen es ideal para el estudio de la eficiencia de la metodología propuesta, pues, como se puede observar en la *Figura 5*, la plataforma estuvo sometida a movimientos aleatorios, presentando un total de 48.475% de píxeles válidos y un 51.525% de píxeles inválidos (reasignados mediante proximidad en la vecindad y sin asignar).

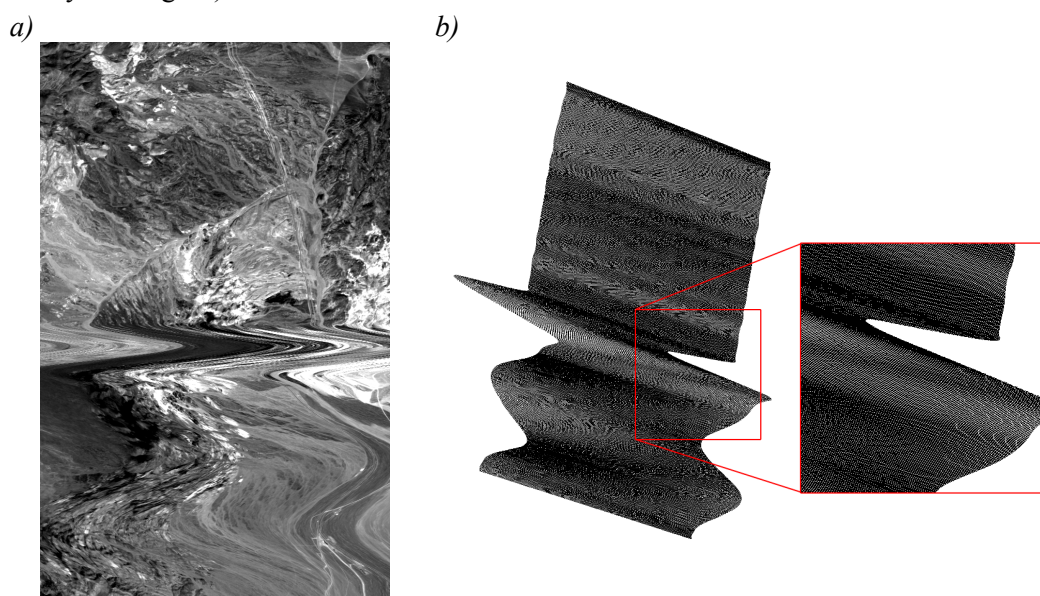


Figura 5: a) Imagen RAW de Cuprite tal y como la capturó el sensor. b) Máscara de geocorrección proporcionado por el fichero GLT.

Para realizar el estudio se han utilizado dos conjuntos de imágenes. El primer conjunto consta de la construcción de la matriz a partir de la imagen original RAW utilizando una resolución igual a la de la imagen geocorregida, por lo que la matriz será más grande y presentará más píxeles sin asignar. Esta imagen original se irá reduciendo gradualmente en subimágenes para probar el rendimiento de la matriz. El segundo conjunto consta de la construcción de la matriz a partir de una región con poco movimiento en la imagen RAW, donde ahora se utilizará una resolución igual a ésta última. De esta manera, la matriz será ahora más pequeña y presentará unas listas de DMR's de mayor longitud que en el conjunto anterior. Igualmente que en el caso anterior, se reducirá dicha región a varias subimágenes gradualmente, para comprobar el comportamiento de la estructura de datos propuesta.

Los parámetros más interesantes a estudiar son el espacio que la estructura ocupa en disco, así como el tiempo empleado en realizar las dos técnicas basadas de tratamiento de imágenes ya explicadas en el *Apartado 3.2*: el umbralizado y el filtrado de mínimo. Ambas comparativas se realizarán usando la estructura de Matriz Difusa propuesta y la imagen original geocorregida de Cuprite.

La implementación de la estructura de datos ha sido llevada a cabo en lenguaje C, sobre el entorno Borland C++ Builder, y ejecutadas sobre un computador Dual Core 2.10 con 4GB de memoria RAM.

En cuanto al análisis de espacio en disco (*Figura 6*), se ha realizado el salvado de la matriz difusa como un vector de DMR's, tal y como se indica en el *Apartado 3.2*, y se ha comparado el tamaño del fichero resultante con el de otras estructuras de almacenamiento de imágenes hiperespectrales utilizadas comúnmente hoy en día en el mercado, como son BSQ, ArcView Raster, ER Mapper, ERDAS IMAGINE, PCI, GeoTIFF y HDF.

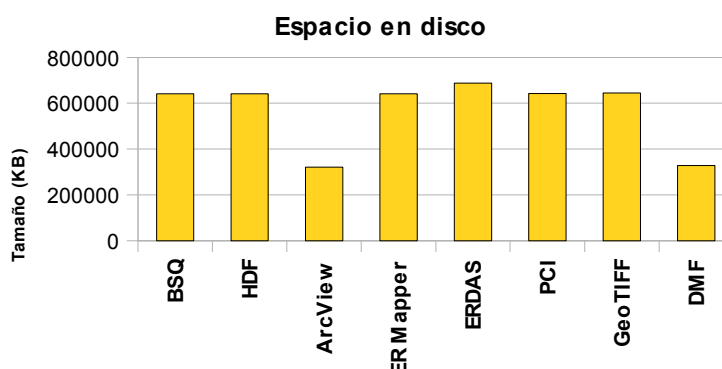


Figura 6: Comparativa del espacio de almacenamiento en disco de varios formatos de almacenamiento de imágenes respecto a la Matriz Difusa (DMF)

Como podemos comprobar, el espacio en disco de la matriz difusa (DMF) es mucho menor que el resto de formatos, ya que la capacidad de almacenar únicamente muestras válidas potencia al máximo este aspecto. Es fácil deducir que la diferencia de tamaño en disco respecto a otros formatos será mayor cuanto más movimiento haya experimentado la plataforma.

En cuanto a las operaciones de umbralizado se ha utilizado un módulo de espectro umbral de 47000, mientras que en las operaciones de filtrado mínimo se ha utilizado un radio de 35 m para el primer conjunto de imágenes, y de 25 m para el segundo, correspondientes a un filtrado con una ventana de 3x3 en la imagen geocorregida original. La *Figura 7* muestra los tiempos de ejecución empleados por los dos tipos de datos en realizar dichas operaciones.

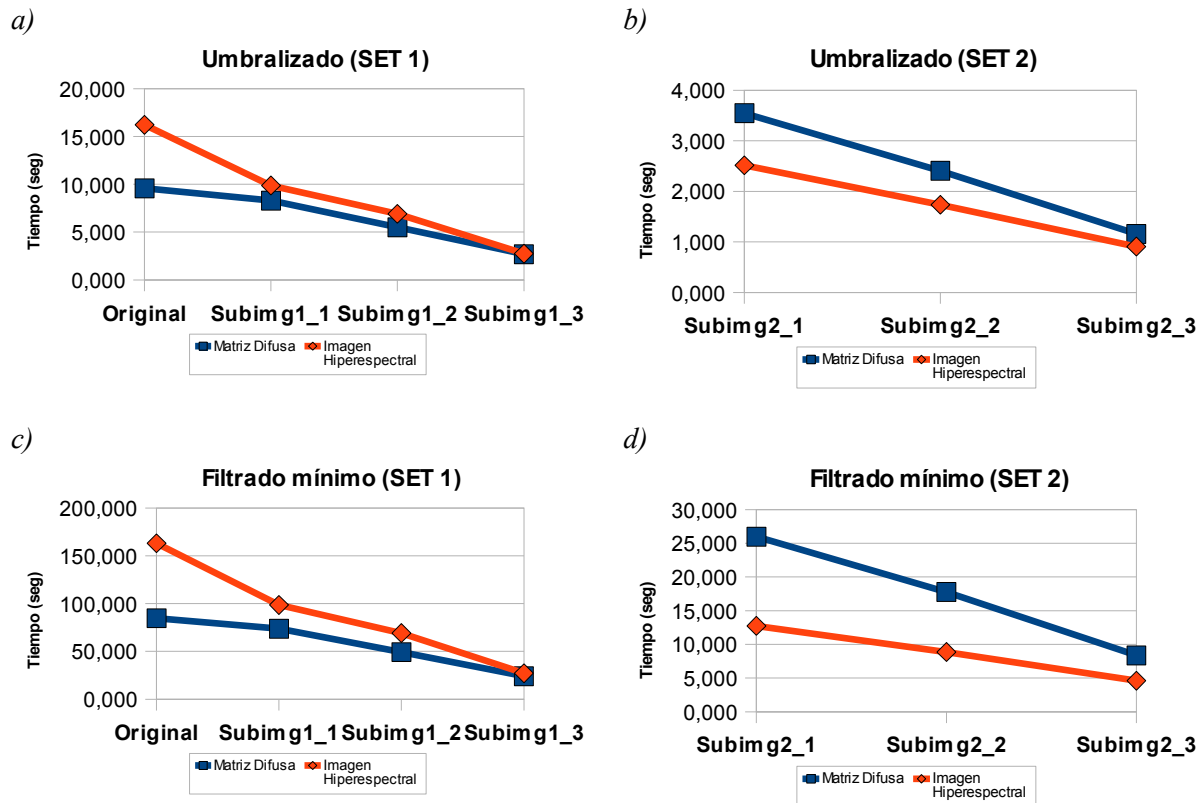


Figura 7: a) Resultados de realizar el umbralizado al primer conjunto de imágenes. b) Resultados de realizar el umbralizado al segundo conjunto de imágenes. c) Resultados de realizar el filtrado de mínimo al primer conjunto de imágenes. d) Resultados de realizar el filtrado de mínimo al segundo conjunto de imágenes.

Como podemos observar, los resultados para el primer conjunto de imágenes son mejores que si aplicamos estas técnicas de tratamiento a una imagen hiperespectral geocorregida. Esto es debido a que existe gran cantidad de píxeles no asignados que no son analizados para el caso de la matriz difusa, mientras que sí lo son para el caso de la imagen geocorregida, por lo que este aspecto conlleva un considerable ahorro de tiempo de procesamiento.

Sin embargo, podemos ver que en el segundo conjunto de imágenes los resultados no son tan buenos como cabría esperar. Esto es debido a que ahora, a pesar de que nuestra matriz es de menor tamaño y el número de celdas a analizar es menor, tenemos un número de DMRs mayor en cada celda, por lo que el tiempo empleado en recorrer las listas se incrementa.

5 Conclusiones

En este artículo se ha presentado una nueva estructura que permite el almacenamiento de los datos procedentes de una imagen hiperespectral. Dicha estructura consiste en una matriz especial (Matriz Difusa) que únicamente almacena los valores medidos por el sensor incluyendo las coordenadas UTM de cada una de las medidas. Esto proporciona grandes ventajas, ya que, al contrario de los formatos convencionales, no estamos considerando píxeles inválidos o procedentes de promediados, por lo que el margen de error a la hora de procesar este tipo de imágenes se reduce considerablemente. Además, mediante el uso de esta estructura es posible el procesamiento de imagen en tiempo real, esto es, a medida que el sensor va obteniendo los datos.

Para almacenar dicha estructura de datos se ha diseñado un nuevo formato de ficheros en la cual se guardan todos los valores medidos por el sensor junto con su localización espacial. El hecho de no almacenar píxeles inválidos o promediados, como es el caso de las imágenes hiperespectrales

geocorregidas, permite una reducción del tamaño en disco que será mayor cuanto más movimiento haya experimentado la plataforma durante la obtención de datos.

En cuanto a las técnicas básicas de procesamiento de imágenes, la estructura propuesta se comporta bien siempre que la carga de las celdas de la matriz sea baja, es decir, si la plataforma ha sido poco sometida a movimientos. En imágenes en las que la carga de las celdas sea alta, estaremos obligados a recorrer listas de medidas, sometiéndonos a la secuencialidad y por tanto, a un incremento del coste del tiempo de ejecución en el procesamiento. Las futuras líneas de investigación se centrarán en resolver este problema utilizando técnicas de paralelismo en redes de computadoras heterogéneas.

Referencias

- [1] Barkstrom, Bruce R.; Folk, Mike, "Attributes of file formats for long-term preservation of scientific Houston, TX, USA, May 27-31, 2003. and engineering data in digital libraries", 3rd ACM/IEEE-CS Joint Conference on Digital Libraries,
- [2]Jordi Inglada, Vincent Muron, Damien Pichard, Thomas Feuvrer, "Analysis of artifacts in subpixel remote sensing image registration", IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing, Vol. 45, N°. 1, January 2007.
- [3] T. M. Lillesand & R.W. Kiefer, "Remote Sensing and image interpretation"., Ed Wiley & Sons, 1999.
- [4]Daniel Schlöpfer, Peter Mayer, Klaus I. Itten, "Parametric geocoding of Aviris data using a ground control point derived flightpath", Summaries of the Seventh JPL Airborne Earth Science Workshop, JPL, Pasadena (CA).
- [5] Página oficial GeoTIFF: <http://trac.osgeo.org/geotiff/>
- [6] Página oficial ER Mapper: <http://ermapper.com/>
- [7] Página oficial ERDAS IMAGINE: <http://www.erdas.com/>
- [8] Página oficial CEOS: <http://www.ceos.org/>
- [9] National Center for Supercomputing Applications, "HDF5 for HDF4 users: a short guide", University of Illinois, Urbana-Champaign, December 3, 2002.
- [10] Página oficial AVIRIS: <http://aviris.jpl.nasa.gov/>

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado dentro de los proyectos financiados por la Junta de Extremadura en su III Plan Regional de Investigación: Oppida: Plataforma Digital de Protección Civil y Medioambiental: *Computación Paralela utilizando Plataformas Grid de Algoritmos Hiperspectrales y su Aplicación al Seguimiento y Control de Incendios.*

Los autores agradecen sus sugerencias y aportaciones a los doctores Dr. D. Pedro Gómez Vilda (Universidad Politécnica de Madrid) y Dr. D. Robert O. Green (Jet Propulsion Laboratory. NASA).